

Sachstandsbericht

Brandverhalten von hochfestem Normalbeton

im Auftrag des

Deutschen Beton-Vereins E.V.

Bahnhofstraße 62, 65185 Wiesbaden

DBV-Nr. A 06/91

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Dr.-Ing. U. Diederichs

Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Hosser

August 1992

(Revision Juli 1993)

INHALT

	Seite
1 Ausgangssituation	3
2 Erkenntnisse aus Materialuntersuchungen	4
3 Erkenntnisse aus Bauteil-Brandversuchen	9
4 Bestehende Kenntnislücken	12
5 Vorschlag weiterer Untersuchungen	13
6 Literaturhinweise	14

1 Ausgangssituation

Etwa seit Anfang der 80er Jahre wurden, insbesondere von Skandinavien ausgehend, die Herstellung und die Eigenschaften von hochfestem Beton (HS-Beton) erforscht. Zwischenzeitlich findet HS-Beton weltweit eine immer breitere Anwendung.

Auch zum Brandverhalten von Konstruktionen aus HS-Beton wurden erste Untersuchungen bereits 1984 in Dänemark [1] und 1985 in den USA durchgeführt. Seit 1987 laufen in größerem Umfang entsprechende Untersuchungen beim VTT in Finnland, an denen auch das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig beteiligt ist [2 - 5]. Inzwischen ist die Erforschung des Materialverhaltens so weit gediehen, daß HS-Beton bereits Eingang in den Building Code of Finland gefunden hat [6]. Auf der ACI Spring Convention 1991 in Boston wurde dem Thema "Fire Resistance of Materials and/or Members made with High-Strength Concrete" eine eigene Session gewidmet, an der Fachleute aus USA, Kanada, Großbritannien, Australien, Finnland, Dänemark und Deutschland teilnahmen [7].

Die in Boston präsentierten Ergebnisse, die vorliegenden Publikationen, unveröffentlichte Untersuchungsberichte sowie mündliche Berichte von Fachleuten lassen eine erste Einschätzung des Hochtemperaturverhalten von HS-Beton und des Brandverhaltens von Bauteilen zu. Es besteht einhellig die Auffassung, daß sich HS-Beton aufgrund seiner äußerst dichten Mikrostruktur und seines im allgemeinen höheren Gehalts an Bindemitteln in seinen Eigenschaften deutlich von den normalfesten Betonen unterscheidet. Seine Hochtemperaturkennwerte lassen sich deshalb nicht durch lineare Extrapolationen entsprechender Kennwerte normalfester Betone gewinnen.

2 Erkenntnisse aus Materialuntersuchungen

Die Ergebnisse eigener Kleinversuche im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz zum Hochtemperaturverhalten von hochfestem Beton und die aus der Auswertung der o.g. Quellen gewonnenen Erkenntnisse zum Materialverhalten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Festigkeit:

HS-Beton zeigt bereits ab 150 °C einen Verlust an Festigkeit, der je nach Mischungszusammensetzung zwischen 20 und 40 %, bezogen auf die Festigkeit bei 20 °C, betragen kann (Bild 1).

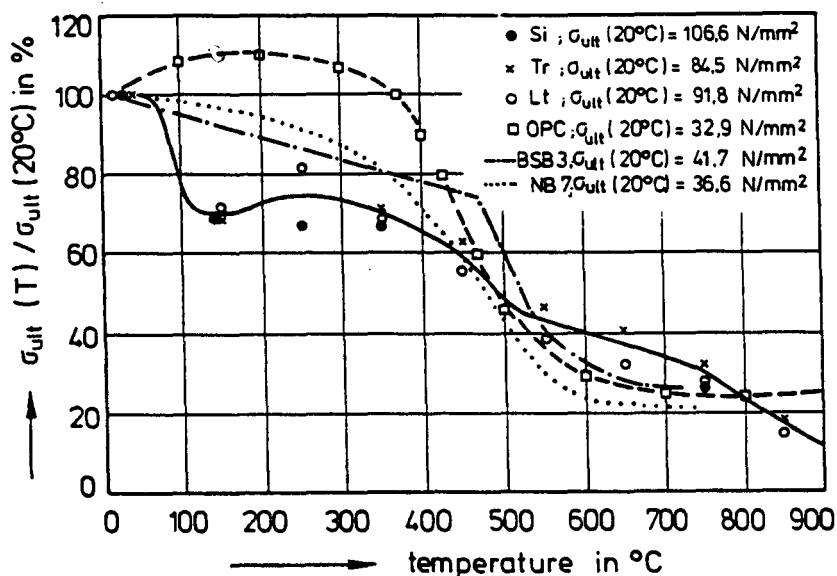


Bild 1 Temperaturbedingter Abfall der Druckfestigkeit von hochfesten und normalfesten Betonen (nach [4])

E-Modul:

Der Abfall des E-Moduls ist im Temperaturbereich 20 °C bis 200 °C sowie im Temperaturbereich 600 °C bis 800 °C vergleichbar mit dem

normalfester Betone. Dazwischen zeigt hochfester Beton im allgemeinen eine geringere E-Modul-Abminderung (Bild 2).

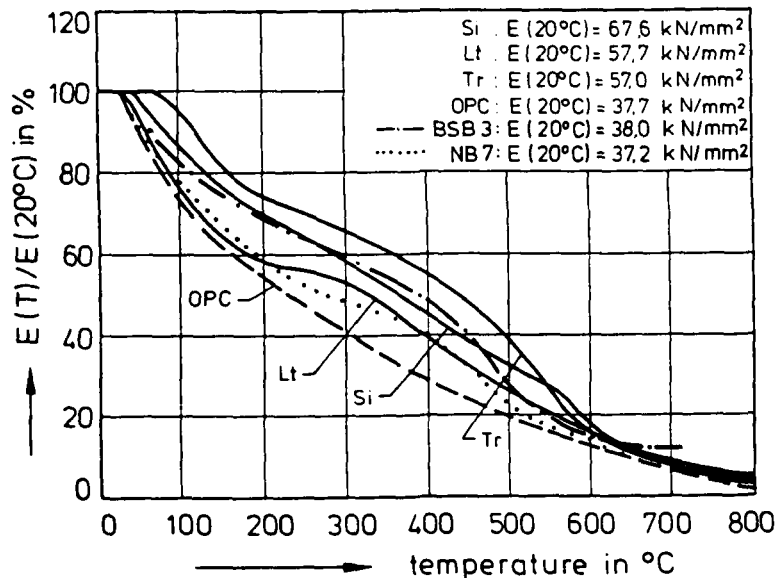


Bild 2 Temperaturbedingter Abfall des E-Moduls von hochfesten und normalfesten Betonen (nach [4])

Spannungs-Dehnungslinien:

Grundsätzlich unterscheiden sich die Spannungs-Dehnungslinien von HS-Beton bei Raumtemperatur und bei Temperaturen ab etwa 350 $^\circ\text{C}$ nicht stark von denen normalfester Betone. In dem dazwischenliegenden Bereich zeigt hochfester Beton jedoch deutlich geringere Bruchdehnungen als normalfester Beton und kaum plastische Verformungen, die den Bruch ankündigen (Bild 3).

Transientes Kriechen:

Während der Aufheizung unter Last (Warmkriechversuch) zeigt hochfester Beton deutlich höhere transiente Kriechverformungen als normalfester Beton. Als Ursache dafür ist der höhere Gehalt an fluider Phase (Bindemittel) anzusehen. Im Gegensatz zu normalfestem Beton, der unter Belastung mit 60 % seiner Kurzzeitfestigkeit im allgemeinen ohne Bruch bis auf rund 500 - 600 $^\circ\text{C}$ auf-

geheizt werden kann, versagt hochfester Beton unter dieser Belastung häufig schon knapp oberhalb 100 °C (Bild 4).

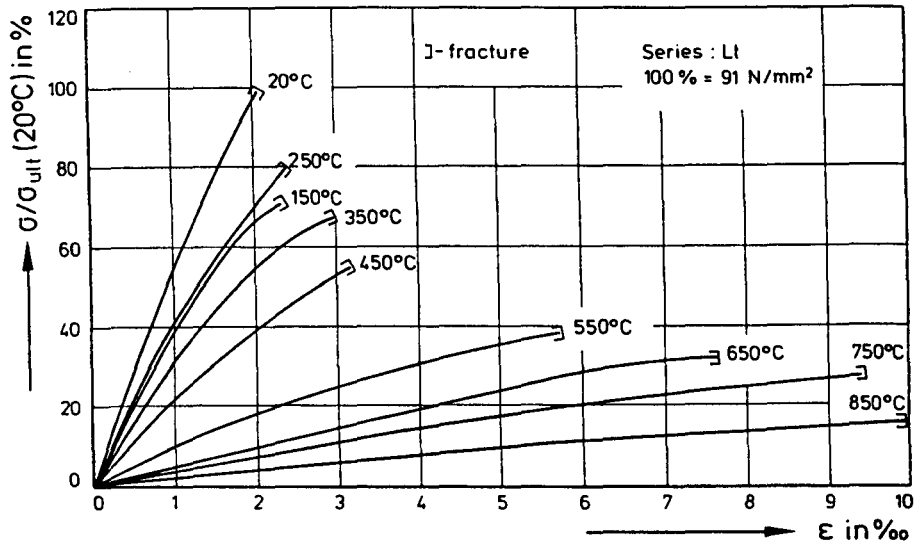


Bild 3 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien eines hochfesten Betons (nach [4])

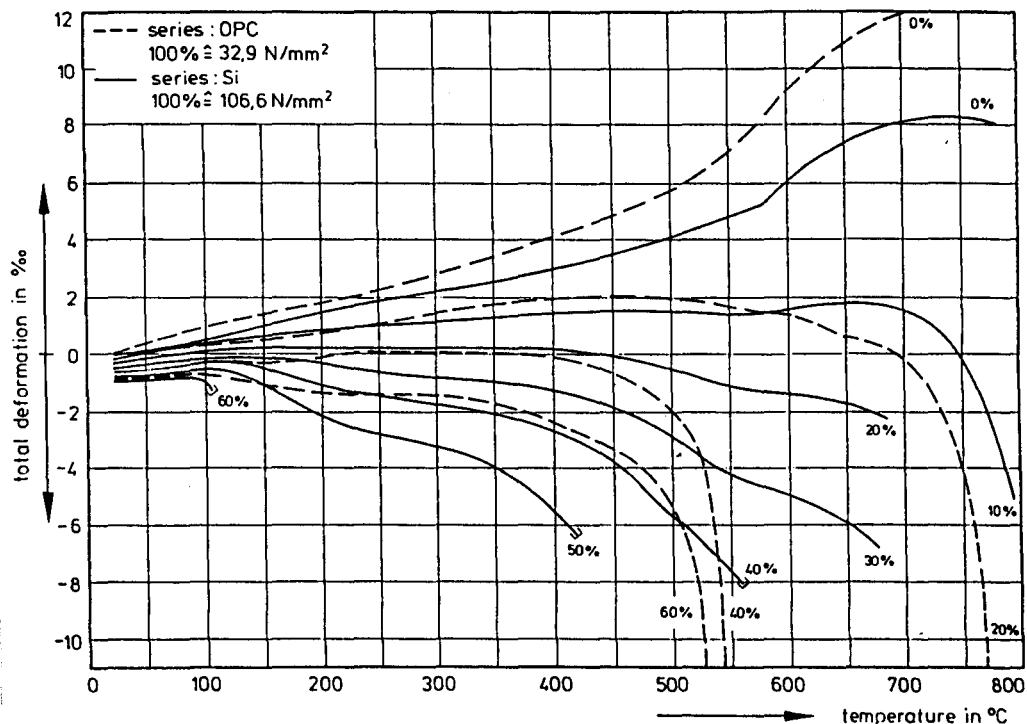


Bild 4 Gesamtverformung von hochfestem und normalfestem Beton bei Warmkriechversuchen

Zwangskraftverlauf:

Hochfester Beton, der während der Aufheizung dehnungsbehindert wird, zeigt deutlich höhere maximale Zwangsspannungen als normalfester Beton. Die hohen Zwangsspannungen werden nach Überschreiten von 100 °C sehr schnell abgebaut und erreichen oberhalb von 200 °C deutlich geringere Werte als normalfesteste Betone (Bild 5).

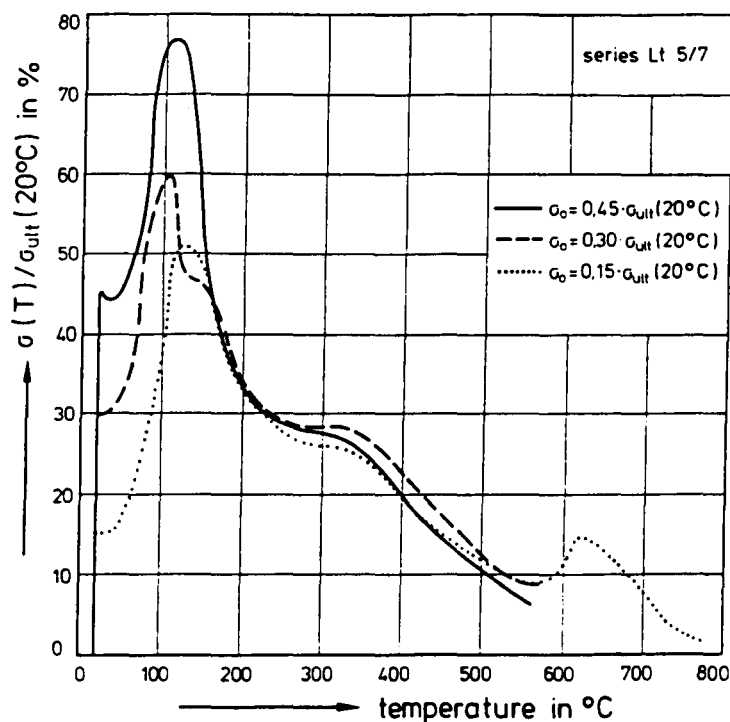


Bild 5 Temperaturabhängige Entwicklung der Zwangsspannungen bei Dehnungsbehinderung mit Einfluß des transienten Kriechens (nach [4])

Abplatzgefahr:

Werden kleine zylindrische Proben (z.B. ϕ 8 cm, l = 30 cm) unter Last mit höheren Geschwindigkeiten aufgeheizt (z.B. 25 K/min), so treten bei sehr dichten Betonen frühzeitig (bei 150 - 350 °C) Abplatzungen auf (Bild 6).

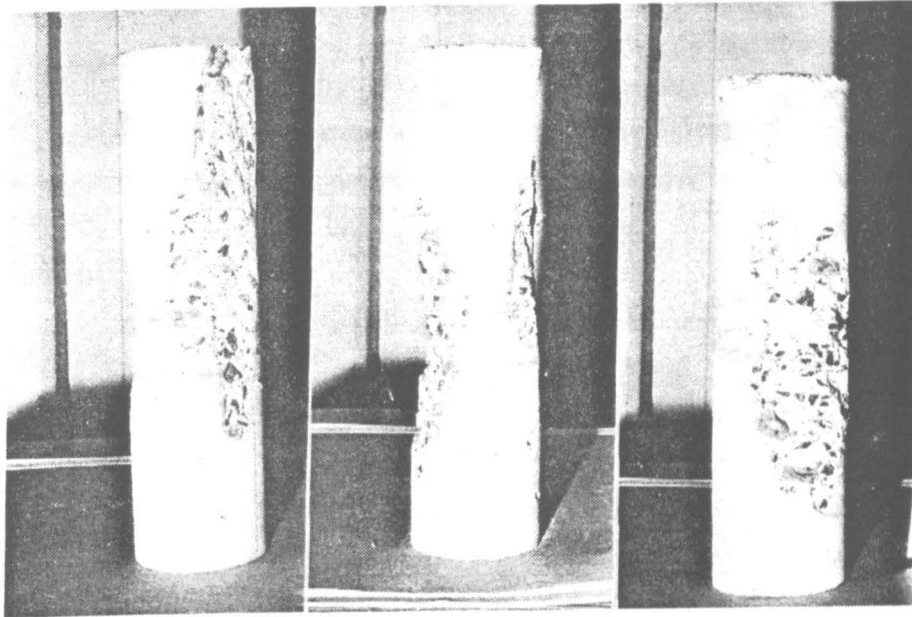


Bild 6 Abplatzungen bei Erwärmungsversuchen mit belasteten Betonzylindern ϕ 80 mm, $l = 300$ mm (30 % von $\beta_{C,20^\circ}$)

Ein erhöhtes Risiko bei der Brandbeanspruchung von Konstruktionen aus hochfestem Beton besteht nach einhelliger Auffassung vor allem darin, daß die Betonelemente durch destruktives Abplatzen entweder versagen oder zumindest Personen gefährden können.

In diesem Zusammenhang wurden insbesondere Technical Research Center of Finland (VTT) in Espoo gemeinsam mit dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Versuche mit Prismen (10 cm x 10 cm x 40 cm) zur Feststellung der Abplatzneigung wie folgt durchgeführt. Die Proben wurden mit 30 - 60 % der Kurzzeitfestigkeit bei Raumtemperatur belastet und dann mit etwa 30 K/min aufgeheizt.

Hierbei traten bei sehr feuchten Proben oder Proben aus besonders dichtem Material während der Aufheizphase (nach Erreichen von ca. 350 °C an der Betonoberfläche) gravierende Abplatzungen und, teilweise auch dadurch bedingt, Kollaps auf.

Andererseits wurden bei Proben, die sehr lange vorgetrocknet waren (z.B. bei 60 °C über mehrere Wochen) solche Abplatzungen nicht festgestellt. Auch Proben, die unter Verwendung von Hochofenzement hergestellt wurden, und bei denen man die Hydratation der äußeren Schichten durch Lagerung in trockenen Räumen relativ früh gestoppt hatte, zeigten keine Abplatzungen. Anhand der vorliegenden Versuche läßt sich die Abplatzneigung aber nicht verläßlich abschätzen.

3 Erkenntnisse aus Bauteil-Brandversuchen

Untersuchungen an Einzelbauteilen aus hochfestem Normalbeton wurden hauptsächlich in Skandinavien (Finnland und Norwegen) sowie im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig durchgeführt.

Im Technical Research Center of Finland (VTT) wurden Brandprüfungen an Stützenabschnitten (30 cm x 30 cm x 1 m bzw. 20 cm x 20 cm x 1 m) durchgeführt. Dabei kam es zu großflächigen, destruktiven Abplatzungen über der Betonbewehrung; teilweise trat ein Kollaps der Versuchskörper ein. Auch bei Versuchen an Fertigteilen kollabierten Wand- und Deckenbauteile etwa 15 - 30 Minuten nach Beginn der Brandbelastung.

Die Prüfanstalt der SINTEF in Trondheim, Norwegen, führte Versuche an Stützen und sogenannten TT-Platten aus hochfestem Beton durch. Auch bei diesen Bauteilen traten explosionsartige Abplatzungen über der Bewehrung auf.

Verschiedentlich wurde Betonen, die in ihrer Festigkeit den hochfesten Betonen sehr nahe kommen, Stahlfasern zur Verhinderung des destruktiven Abplatzens beigegeben. Bei Brandversuchen an solchen Elementen traten jedoch ähnlich gravierende Abplatzungen auf wie bei den gleichen Elementen aus Beton, dem keine Stahlfasern zugegeben wurden.

Im Rahmen von Einzelfall-Begutachtungen für verschiedene Antragsteller wurden im iBMB mehrere Brandprüfungen mit Stützenabschnitten und Stützen aus hochfestem Beton durchgeführt [8 - 10], bei denen ebenfalls erhebliche Abplatzungen zu beobachten waren (Bild 7). Diese traten jeweils etwa 15 - 30 Minuten nach Beginn der Beflammung auf und waren zumindest mitverantwortlich für das spätere Versagen der Prüfkörper. In diesem Zusammenhang ist hervorzuheben, daß die Prüfkörper bei einigen Versuchen über mehrere Wochen bei erhöhten Temperaturen (60 °C) vorgetrocknet waren, um destruktive Betonabplatzungen aufgrund zu hoher Bauteilfeuchte zu verhindern bzw. die Tendenz zum Abplatzen zu verringern.



Bild 7 Abplatzungen bis zur Bügelbewehrung in der Druckzone einer gedrunenen, ausmittig belasteten Stütze

Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch bei Versuchen im iBMB mit Stützen aus Schleuderbeton. Dieser erreicht zwar sehr hohe Festigkeiten, wird aber üblicherweise nicht dem hochfesten Beton zugeordnet. Trotzdem ergaben die Brandprüfungen eine stärkere Neigung zu destruktiven Abplatzungen über der Längsbewehrung als bei normalfestem Beton.

Aufgrund der negativen Erfahrungen wurden bei neueren Prüfungen im iBMB die Stützen aus hochfestem Beton mit einer äußeren Netzbewehrung versehen. Dadurch konnte eine ausreichend dicke Betonschicht über der Bewehrung wirksam gegen Herabfallen gesichert werden und damit die Bewehrung länger gegen direkte Temperaturbeaufschlagung geschützt werden. Oberhalb der Netzbewehrung traten allerdings zum Teil sehr großflächige Ablösungen der ungeschützten äußeren Betonschale auf.

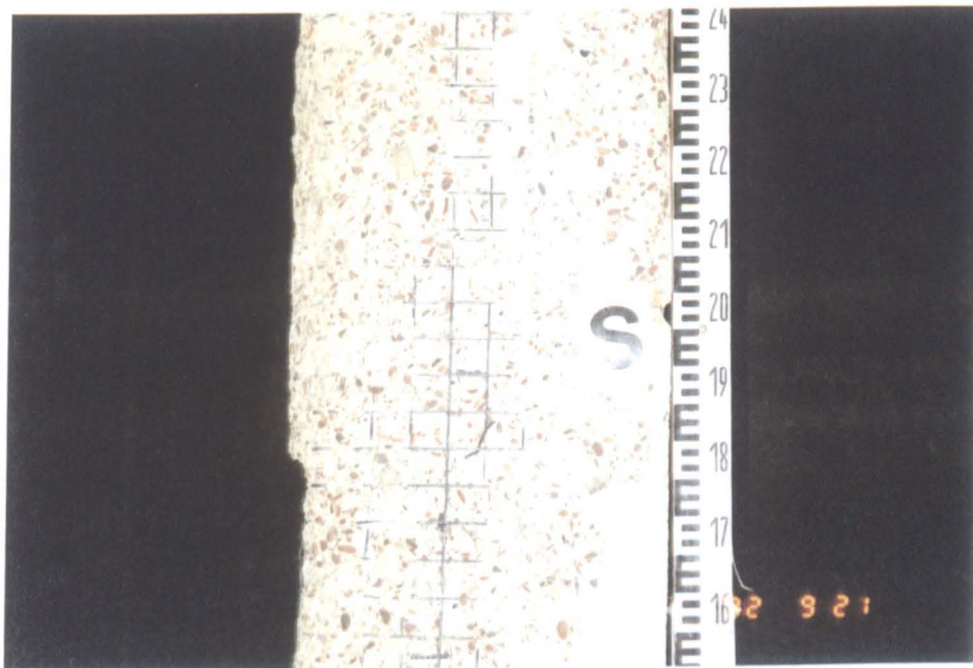


Bild 8 Beschränkung der Abplatzungen auf die äußerste Betonschicht durch eine Netzbewehrung mit $\text{nom } c = 1,5 \text{ cm}$

Nach mündlichen Berichten aus Großbritannien und Japan stellen die Abplatzungen bis heute dort die größte Barriere für die allgemeine Anwendung von hochfestem Beton für Bauteile, die bestimmte Anforderungen an den Feuerwiderstand erfüllen müssen, dar.

Berichte aus den USA deuten dagegen darauf hin, daß dort hochfeste Betone hinsichtlich ihres Brandverhalten nicht wesentlich anders als normalfeste Betone behandelt werden. Dies ist - nach Rücksprache mit den beteiligten Wissenschaftlern - darauf zurückzuführen, daß die amerikanische Brandnorm ausdrücklich vorsieht, Betonkonstruktionen mit einem vorgeschriebenen Mindestgehalt an Feuchtigkeit zu prüfen. Ursprünglicher Gedanke dieser Vorschrift war es zu verhindern, daß Bauteile durch starke Feuchtigkeitszufuhr künstlich höhere Feuerwiderstandsdauern erlangen als langfristig in normaler Atmosphäre gelagerte Bauteile. Aufgrund dieser Prüfvorschrift wurden die Proben künstlich so lange bei erhöhten Temperaturen getrocknet, bis sie die erforderliche geringe Feuchtigkeit erreicht hatten. Bei den nachfolgenden Prüfungen traten dann auch erwartungsgemäß keine Abplatzungen auf. Solche Austrocknungsgrade werden aufgrund der sehr dichten Struktur in der Praxis jedoch nicht erreicht, so daß bei den Bauelementen in einem Schadenfeuer ebenfalls explosionsartige Abplatzungen und dadurch bedingte Verluste der Tragfähigkeit zu erwarten sind.

4 Bestehende Kenntnislücken

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß über das Materialverhalten hochfester Betone international gesehen durchaus umfangreichere Erkenntnisse vorliegen. Da sich die im Ausland untersuchten Betone jedoch hinsichtlich der Zemente und Zuschläge von den in Deutschland produzierten HS-Betonen unterscheiden und weil die bisher vorliegende Datenbasis zur sicheren Beurteilung des Hochtemperaturverhaltens nicht ausreichend ist, sind systematischere Untersuchungen zum Brandverhalten von Bauteilen aus hochfestem Beton dringend erforderlich.

Dabei bedarf vor allem das Materialverhalten unter hohen Temperaturen einer raschen Klärung, um Grundlagen für rechnerische Nachweise zu erhalten. Da die Die Neigung hochfester Betone zum Abplatzen zur Zeit das größte Hindernis für eine breite Anwendung dieser Betone zur Herstellung von Bauteilen, die bestimmte Anforderungen hinsichtlich Brandsicherheit erfüllen müssen, darstellt sind entsprechende Forschungsanstrengungen nicht nur aus wissenschaftlicher Sicht von allerhöchstem Interesse.

5 Vorschlag weiterer Untersuchungen

Im einzelnen besteht bezüglich des Hochtemperaturverhaltens hochfester Betone und des Brandverhaltens von Druckgliedern aus hochfestem Beton folgender Forschungsbedarf:

a) Schaffung von Rechengrundlagen für Nachweise (kurzfristig):

Ermittlung von Werkstoffkenngrößen unter hohen Temperaturen (Warmkriechverhalten, Zwangkraftentwicklung bei Erwärmung, Spannungs-Dehnungs-Verhalten, Festigkeit, E-Modul, Wärmeleitfähigkeit usw.).

b) Untersuchungen des Bauteilverhaltens (kurzfristig):

Experimentelle Untersuchung des Verhaltens von typischen Bauteilarten unter Brandangriff zwecks allgemeingültigerer Klassifizierung des Feuerwiderstandes und Erprobung von konstruktiven Maßnahmen zur Verbesserung des Brandverhaltens.

Einbeziehung der unter a) erarbeiteten Rechengrundlagen in rechnerische Nachweisverfahren für das Brandverhalten von Bauteilen aus hochfestem Beton. Nachrechnung der durchgeführten Brandversuche an Stützen im Hinblick auf die Verifizierung bzw. Weiterentwicklung der rechnerischen Nachweisverfahren.

c) Betontechnologische Untersuchungen (mittelfristig):

Studium der Phänomene, die zum Abplatzen von Beton bei schneller Erhitzung führen (Ermittlung der für den Wasser-Wasserdampftransport entscheidenden Porengrößen, Umfang des Wasser- bzw. Wasserdampftransport durch diese Poren, Aufbau des Wasser- bzw. Wasserdampfdruckes im Beton).

Experimentelle und theoretische Ermittlung von Porenverteilungen, bei denen ein sicheres Ableiten des Wassers bzw. des Wasserdampfs ohne zerstörende Abplatzungen erfolgt.

Erforschung von Möglichkeiten zur zielsicheren Herstellung von Beton mit Porensystemen bei deren Vorhandensein destruktive Abplatzungen unter Brandeinwirkung ausgeschlossen werden können (etwa vergleichbar mit der Erzeugung künstlicher Luftporen zur Vermeidung von Frostschäden).

Erarbeitung von Modellen oder Bemessungsverfahren zur Abschätzung des Abplatzrisikos anhand bestimmter Materialparameter, wie Druckfestigkeit und Porenradienverteilung des Betons, Feuchtigkeitsgehalt, mechanische Belastung, Temperaturanstiegsgeschwindigkeit an der Betonoberfläche, Bewehrungslage, Abmessungen usw..

6 Literaturhinweise

- [1] Hertz, Kristian: Heat-induced explosion of dense concretes. Technical University of Denmark, Report no. 166, Lyngby 1984, 20 p
- [2] Diederichs, u. et al.: Material properties of high strength concrete at elevated temperatures. In: 13. IVBH 1988, Helsinki, S. 489 - 494

- [3] Diederichs, U., Jumppanen, U.-M.: High-Temperature Properties and Spalling Behaviour of High-Strength Concrete. Technologie und anwendung der Baustoffe, Festschrift zum 60. Geburtstag von Ferdinand S. Rostásy, Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, 1992
- [4] Diederichs, U., Jumppanen, U.-M., Penttala, V.: Behaviour of high-strength concrete at high-temperatures. Helsinki University of Technology, Department of Structural Engineering, Report 92, Espoo 1989, 76 p
- [5] Jumppanen, U.-M., Diederichs, U., Hinrichsmeyer, K.: Material properties of F concrete at high temperatures. Technical Research Center of Finland, Research Report 452, Espoo 1989, 60 p
- [6] Concrete Association of Finland: High Strength Concrete, Supplementary Rules and Fire Design. Rak Mk B4, 1991
- [7] ACI, 1991 Spring Convention, March 17 - 19, Boston, Mass., USA, Session "Fire Resistance of Materials and/or Members made with High-Strength Concrete"
- [8] Hosser, D.: Gutachtliche Stellungnahme Nr. G 90056 Zum Brandverhalten von Stützen und Wänden aus Beton der Festigkeitsklasse B 85 mit überwiegend zentrischer Druckbeanspruchung beim Buvorhaben Bankhaus BfG in Frankfurt/Main. Braunschweig, 15.05.1990
- [9] Hosser, D.: Gutachtliche Stellungnahme Nr. G 92113 Zum Brandverhalten von Stützen aus Beton der Festigkeitsklasse B 85 mit überwiegend zentrischer Druckbeanspruchung beim Bauvorhaben Bauer Druck KG, Neubau Gebäude 13, Köln. Braunschweig, 29.12.1992
- [10] Hosser, D.: Gutachtliche Stellungnahme Nr. G 93054 Zum Brandverhalten von Stützen aus hochfestem Beton der Festigkeitsklasse B 115 mit überwiegend zentrischer Druckbeanspruchung beim Bauvorhaben Zoofenster Berlin der Brau- und Brunnen AG, Dortmund. Braunschweig, 26.02.1993

16. März 2000